

ملاءمة الألووريتيمات الوراثة لاستخدامها في الجدولة الزمنية لمشروعات التشييد

الدكتور علي الدياب*

الدكتور حمزة علي**

نسيب زعرور***

(تاريخ الإيداع 6 / 1 / 2008. قُبل للنشر في 29/7/2008)

□ الملخص □

تُعتبر نظرية الألووريتيمات الوراثة من أفضل و أحدث الطرق الرياضية المستخدمة في إيجاد الحل الأمثل للمسائل ذات الحلول الكبيرة العدد.

إن مسألة الجدولة الزمنية هي من أهم المسائل في الإدارة الهندسية التي تحتل العدد الكبير جداً من الحلول، إذ يُطلب إيجاد تسلسل تنفيذ العمليات (النشاطات) لمشروع ما مع مراعاة قيود الأسبقية و الموارد القابلة للتجدد، و من دون تغيير في مدد العمليات أو تقسيمها أو تغيير الموارد القابلة للتجدد اللازمة لها، بحيث يتم الحصول على الجدول الزمني الأقصر لمشروع التشييد.

وهذا البحث يعنى بملاءمة الألووريتيمات الوراثة لكي تصبح قادرة على حل المسألة المذكورة أعلاه ، إذ يتم التعبير عن مكونات مسألة الجدولة الزمنية بنماذج المفتاح العشوائي.

الكلمات المفتاحية: تشييد - إدارة المشروع - جدولة زمنية - ألووريتيمات وراثية - مفتاح عشوائي.

* مدرس - قسم الإدارة الهندسية و الإنشاء بكلية الهندسة المدنية - جامعة البعث - حمص - سورية.
** مدرس - قسم الإدارة الهندسية و الإنشاء بكلية الهندسة المدنية - جامعة البعث - حمص - سورية.
*** طالب دراسات عليا (ماجستير) - قسم الإدارة الهندسية و الإنشاء بكلية الهندسة المدنية - جامعة البعث - حمص - سورية.

Fitting Genetic Algorithms Into Scheduling Construction Projects

Dr. Ali Al-Dabbab*
Dr. Hamza Ali**
Nasib Za'rour***

(Received 6 / 1 / 2008. Accepted 29 / 7 / 2008)

□ ABSTRACT □

The genetic algorithms theory is considered one of the best and newest mathematical methods being used to find the optimal solution to problems that have a great number of solutions. The scheduling problem is one of the most important problems in engineering management that has a variety of solutions, where the request is to find the sequence of executing the tasks (activities) of a project, taking precedence and renewable resources constraints into account, without changing the duration of the tasks or splitting them or changing the renewable resources needed for the tasks in order to get the shortest schedule for the construction project. This paper is concerned with fitting genetic algorithms in order to be capable of solving the problem mentioned above, where the construction project scheduling problem components are expressed by random key types.

Keywords: Construction, Project Management, Scheduling, Genetic Algorithms, Random Key.

* Assistant Professor, Department of Management and Construction Engineering, Faculty of Civil Engineering, Al-Baath University, Homs, Syria.

** Assistant Professor, Department of Management and Construction Engineering, Faculty of Civil Engineering, Al-Baath University, Homs, Syria.

*** Postgraduate Student, Assistant Professor, Department of Management and Construction Engineering, Faculty of Civil Engineering, Al-Baath University, Homs, Syria.

مقدمة:

من المعروف أن مسألة الجدولة الزمنية لمشروع التشييد قد تكون لحالة موارد غير محدودة أو لحالة موارد محدودة. إن افتراض توافر الموارد بشكل غير محدود يكون مبرراً في المشاريع السريعة أو ذات الأهمية الاستثنائية، أما في الحالة العادية فإن الموارد بصورة عامة تكون محدودة. وفي حالة الموارد المحدودة لا يمكن للنشاطات التي تحتاج الموارد نفسها أن تكون متزامنة، وبالتالي نرى أن الموارد تفرض بعض القيود في أثناء الجدولة الزمنية. إن إيجاد مدة المشروع الأصغرية هو الهدف المطلوب للجدولة الزمنية لمشاريع التشييد في هذا البحث ، لذلك تسمى المسألة المطروحة في هذا البحث: الجدولة الزمنية لمشروع التشييد بوجود قيود الموارد " Construction project scheduling with resource constraints" (Toklu, 2002) إذ سنقوم بإعداد الألوغوريتيمات الوراثة عند استخدام نماذج مختلفة لتمثيل مفتاح عشوائي بهدف إيجاد أقصر الجداول الزمنية الممكنة لتنفيذ مشروع التشييد بوجود قيود الأسبقية بين العمليات و قيود محدودية الموارد القابلة للتجدد (مثل اليد العاملة و الآليات و المعدات ...). ومن دون السماح بتغيير مدة أي عملية أو تقسيمها أو تغيير الموارد القابلة للتجدد اللازمة لها و مع اعتبار أن جميع المعطيات مؤكدة . و باعتبار أن إيجاد مدة المشروع الأصغرية هو الهدف فإن مسألة الجدولة الزمنية لمشروع التشييد بوجود موارد غير محدودة يمكن أن تُحل بسهولة باستخدام تقنيات بسيطة مثل طريقة المسار الحرج CPM و غيرها، إلا أنه لحل المسألة الأكثر عمومية وهي مسألة الجدولة الزمنية لمشروع التشييد بوجود قيود الموارد (أي بوجود موارد محدودة) فإننا سنحتاج إلى استخدام تقنيات أكثر فعالية مثل نظرية الألوغوريتيمات الوراثة ، وهي التقنية التي سنستعملها في هذا البحث. إن المسألة المطروحة وهي الجدولة الزمنية لمشروع التشييد بوجود قيود الموارد يمكن تسميتها أيضاً بـ " ترشيح الموارد " (توزيع الموارد) Resource allocation كما تسمى أحياناً " الاستخدام الأمثل لمصادر العمل المحدودة " (الحسين، 2003) (شعبان، 1998) . كما يُشار إليها في بعض المراجع بـ "مسألة الجدولة الزمنية للمشروع المقيد الموارد" (RCPS) (Kolisch, 1999) .

هدف البحث و أهميته:

يرمي هذا البحث إلى مُلاءمة الألوغوريتيمات الوراثة لتصبح قادرة على إيجاد الجداول الزمنية الأصغرية الممكنة لتنفيذ مشروع التشييد بوجود قيود الأسبقية بين العمليات و قيود محدودية الموارد القابلة للتجدد (مثل اليد العاملة و الآليات و المعدات ...). من دون السماح بتغيير مدة أي عملية أو تقسيمها أو تغيير الموارد القابلة للتجدد اللازمة لها، و ذلك باعتبار أن جميع المعطيات مؤكدة deterministic (دون اعتبار مبدأ عدم التأكد) . و يتم استخدام نظرية الألوغوريتيمات الوراثة من خلال وضع نماذج مختلفة لتمثيل مفتاح عشوائي خاص بالمسألة المطروحة. إن نظرية الألوغوريتيمات الوراثة هي نظرية رياضية توصل إلى الحل الأمثل للمسألة بحالة وجود عدد كبير من الحلول الممكنة، و كون مسألة الجدولة الزمنية هي من هذا النوع فذلك سيتم استخدام نظرية الألوغوريتيمات الوراثة، و لكن يجب ملاءمتها لتصبح قادرة على حل المسألة.

إن مسألة الملاءمة تحتاج لإيجاد طريقة متكاملة و بخطوات واضحة و مترابطة، و هذه الخطوات سيتم شرحها لاحقاً، و تتلخص بتكوين مجموعة من الحلول الممكنة، و من ثم حذف بعضها و الإبقاء على بعض الحلول الجيدة و بشكل تكراري، و لإنجاز ذلك فإننا نحتاج لطريقة فعالة لتمثيل الحلول، و بالتالي القيام بعملية اصطفاء فعالة. إن طرق التمثيل التقليدية المستخدمة حالياً في الألوغوريتيمات الوراثة لا تلائم بشكل جيد الجدولة الزمنية و لذلك سنقوم باستخدام

تمثيل مفتاح عشوائي، وهو من أنواع التمثيل الحديثة و الفعالة التي يمكن استخدامها لتمثيل الجدول الزمني حيث سنستخدم هذا التمثيل في الألوغوريطمات الوراثة التي سيتم ملاءمتها لحل مسألة الجدولة الزمنية لمشروع التشييد بوجود قيود الموارد.

طرائق البحث ومواده:

يتم في هذا البحث الاستعانة بالمراجع المتعلقة بالجدولة الزمنية لمشروعات التشييد و بالمراجع المتعلقة بالألوغوريطمات الوراثة ، و بما أن الألوغوريطمات الوراثة من الصعب جداً تطبيقها يدوياً، فإنه توجد حاجة للاستعانة بالحاسبات الإلكترونية لتطبيقها ، و نقوم بتحقيق هدف البحث المذكور فيما سبق من خلال الاستفادة من خصائص الجدولة الزمنية لمشروعات التشييد و خصائص الألوغوريطمات الوراثة، وكذلك من خلال استعمال الحاسبات الإلكترونية للجدولة الزمنية لمشروعات التشييد باستخدام الألوغوريطمات الوراثة.

الجدولة الزمنية لمشروع التشييد بوجود قيود الموارد :

يمكن أن تعطى مسألة الجدولة الزمنية لمشروع التشييد بوجود قيود الموارد كما يلي (Kolisch, 1999) (Toklu, 2002) : يتألف مشروع التشييد من مجموعة $J=\{0,1,\dots,n,n+1\}$ من النشاطات الواجب إنجازها، ويمثل النشاطان الوهميان 0 و $n+1$ على التوالي بداية و نهاية المشروع ، و العلاقات المتبادلة بين النشاطات متمثلة بنوعين من القيود:

1- قيود الأسبقية تفرض عدم بدء النشاط إلا بانقضاء زمن محدد مسبقاً.

2- إنجاز النشاطات يتطلب وجود موارد قابلة للتجدد بكميات محدودة .

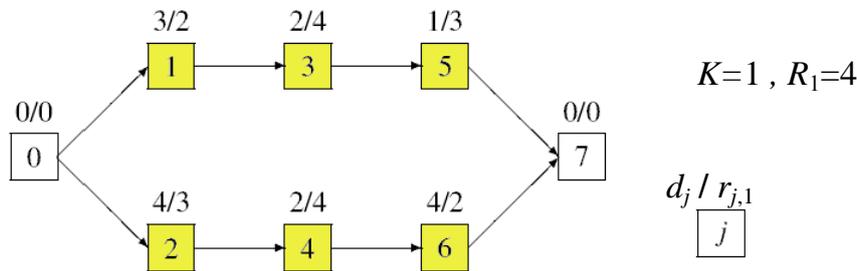
لدينا العدد K من الموارد معطاة بالمجموعة $K = \{1, \dots, K\}$. إن النشاط z يتطلب $r_{j,k}$ وحدة من نوع الموارد $k \in K$ خلال كل فترة من مدته غير القابلة للانقطاع d_j . إن نوع الموارد k سعة محدودة إذ يمكن أن تكون السعة ثابتة R_k أو تكون السعة متغيرة $R_{k,t}$ خلال مدة مشروع التشييد. لقد تم افتراض الوسائط R_k (أو $R_{k,t}$) ، $r_{j,k}$ ، d_j بأنها مؤكدة. لدينا لنشاطي بداية المشروع ونهايته: $d_j = 0$ و $r_{j,k} = 0$ لكل $k \in K$. إن زمن بدء النشاط z يرمز له بـ S_j و زمن انتهاء النشاط هو f_j . إن هدف مسألة الجدولة الزمنية لمشروع التشييد بوجود قيود الموارد هو إيجاد أزمنة انتهاء ممكنة حسب الأسبقية والموارد لكل النشاطات، بحيث تكون مدة المشروع أصغرية . سنقوم برسم شبكات الأسبقية لمشاريع التشييد حسب قواعد طريقة النشاطات على العقد وفيما يلي نبين مثلاً على ما سبق ذكره:

1- مثال لمشروع تشييد:

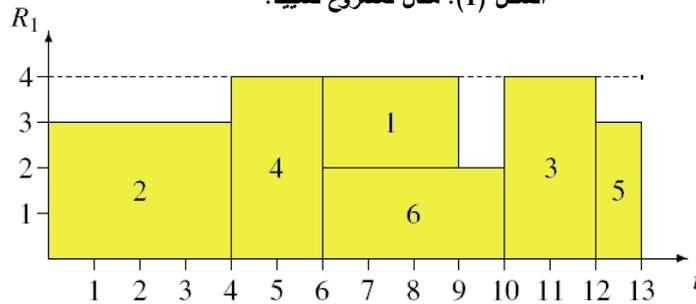
نبين في الشكل (1) مثلاً لمشروع تشييد يتضمن $n = 6$ أنشطة يجب أن تجدد زمنياً تبعاً لـ $K=1$ من أنواع الموارد القابلة للتجدد، وسنعتبر أن اليد العاملة هي الموارد القابلة للتجدد المحدودة في هذا المثال، وهذه الموارد ذات سعة ثابتة خلال مدة المشروع مساوية لـ 4 وحدات (أي أربعة عمال)، إن علاقات الأسبقية في هذا المثال من النوع نهاية إلى بداية مع فترة تأخر lag معدومة، و نبين في الجدول (1) علاقات الأسبقية و مدة كل نشاط والموارد اللازمة لهذه النشاطات و سنعتبر أن زمن بدء المشروع هو الزمن 0 و نبين في الشكل (2) جدولاً زمنياً ممكناً ذا مدة أمثلية هي 13 يوماً.

الجدول (1): خصائص النشاطات.

النشاط (العملية)	الوصف	الأسبقية	المدة (يوم)	استخدام الموارد
1	ترحيل و تسوية للموقع	-	3	2
2	تنفيذ الأساسات	-	4	3
3	تمديد شبكات الترخيم	1	2	4
4	تركيب الهيكل	2	2	4
5	أعمال المسطحات الخضراء	3	1	3
6	أعمال الواجهات	4	4	2



الشكل (1): مثال لمشروع تشييد.



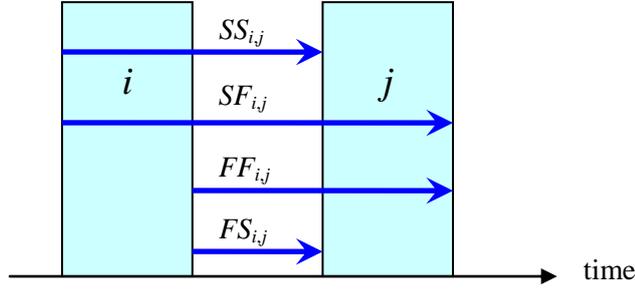
الشكل (2): مثال لجدول زمني.

2- الموارد القابلة للتجدد والمحدودة وعلاقات الأسبقية:

إن الموارد القابلة للتجدد المحدودة في مسألة الجدولة الزمنية لمشروع التشييد تكون مقيدة على أساس الفترة الزمنية، وفي حالة الموارد القابلة للتجدد ذات السعة الثابتة خلال الزمن، و بغض النظر عن مدة المشروع، فإن كل نوع من الموارد القابلة للتجدد يكون متوفراً بسعة ثابتة لكل فترة زمنية. و توجد أمثلة كثيرة للموارد القابلة للتجدد في مشروعات التشييد كالأليات والمعدات واليد العاملة وغيرها، وهي الموارد التي ستؤخذ بالاعتبار لعملية الجدولة الزمنية في هذا البحث.

يوجد أربع علاقات أسبقية ممكنة بين النشاط السابق i والنشاط التالي (اللاحق) j وهي: علاقة نهاية إلى بداية $FS_{i,j}$ و علاقة بداية إلى بداية $SS_{i,j}$ و علاقة نهاية إلى نهاية $FF_{i,j}$ و علاقة بداية إلى نهاية $SF_{i,j}$ ، إنها تدل على

فترات التأخر (Lags) الأصغر المرغوبة بين النشاطات التالية والنشاطات السابقة . و يبين الشكل (3) علاقات الأسبقية.



الشكل (3): علاقات الأسبقية.

إن جدولاً زمنياً S يعطى بواسطة متجه أزمنة الانتهاء ، و بالتالي يكون الهدف هو حل أزمنة الانتهاء $F = (f_1, f_2, \dots, f_n)$ للنشاطات $1, 2, \dots, n$ ، كما يمكن اعتبار المسألة هي حل أزمنة البدء $S = (s_1, s_2, \dots, s_n)$. و لا مفر من استخدام طرق الحل الاستكشافية عند حل المسائل الكبيرة للجدولة الزمنية لمشروع التشييد بوجود قيود الموارد، كالتالي تظهر عادةً في الحالات العملية (Kolisch, 1999) .

الألوغوريتيمات الوراثية:

الألوغوريتيمات (الخوارزميات) الوراثية Genetic Algorithms (GAs) هي إستراتيجية استكشافية عليا Metaheuristic تنفيذ في حل مسائل الأمثلية الصعبة و هي تتبع المبادئ الأساسية للتطور الحيوي.

و يتضمن المفهوم التقليدي للألوغوريتيم الوراثي المكونات الأربعة الأساسية التالية (Hartmann, 1999):

1- تابع الملاءمة The fitness function: يقيس جودة الحل ويتم عادةً في تعابير التابع الهدف الضمني، ولكن قد يأخذ بالاعتبار أحياناً انتهاك القيود.

2- مؤثر التصالب The crossover operator: يعرّف كيفية إعادة تركيب حلين لتكوين حل جديد.

3- مؤثر الطفرة The mutation operator: يغير عشوائياً أجزاء "مورثات genes" حل موجود.

4- مؤثر الاختيار The selection operator: مسؤول عن تقرير أيّ الحلول جيدة بما فيه الكفاية لكي تبقى

حية" (و تنتج نزية في الجيل التالي) و أيّ الحلول ستحذف.

يجب عدم الخلط بين "مؤثر الاختيار" المذكور أعلاه و المستخدم لتكوين الجيل الجديد و بين "طريقة اختيار

الآباء" والتي بواسطتها يتم تحديد الحلول التي ستستخدم في التصالب.

عموماً تحوي العديد من الألوغوريتيمات الوراثية المكونين التاليين أيضاً (Hartmann, 1999):

- التمثيل The representation: يكون البنية الوراثية للفرد ويشفر الحلول لمسألة الأمثلية .

- إجراء فك التشفير The decoding procedure: يلزم لحساب الحل الفعلي الذي يمثله الفرد.

في حين أن المكونات المذكورة أعلاه للألوغوريتيم الوراثي (GA) هي الأكثر أهمية، فإنه توجد بضعة مكونات

يمكن أن يتم إدخالها لخصائص مسألة معينة.

يبدأ الألوغوريتم الوراثي بابتداء (initializing) مجتمع من الأفراد، و بعد إنشاء المجتمع الابتدائي يتم اختيار الأفراد من المجتمع، ثم تتزوج لتشكّل حلاً جديدة، تتفدّ عملية التزاوج من خلال تركيب (أو تصالب crossover) المادة الوراثية من أبوين لتشكيل مادة وراثية لحل واحد أو حلين، حيث يتم منح البيانات من جيل حلول إلى الجيل التالي. تُطبق الطفرة (mutation) العشوائية دورياً لتعزيز التنوع. أي أنه يتم إنتاج حلول جديدة من خلال تزاوج حلين موجودين (تصالب) و/أو من خلال تغيير حل موجود (طفرة). وبعد إنتاج حلول جديدة، فإن الحلول الأكثر ملاءمة تبقى حية و تصنع الجيل التالي بينما تحذف الحلول الأخرى، و هكذا تنتقل من جيل إلى جيل في الألوغوريتم الوراثي. تقيس قيمة الملاءمة جودة الحل و تكون عادةً مستندة إلى قيمة التابع الهدف لمسألة الأمثلية المطلوب حلها (Kolisch, 1999). توجد أشكال مختلفة ممكنة فمثلاً توجد خوارزميات اختيار متنوعة، وكذلك يوجد تنوع واسع من طرق التزاوج حسب التمثيل، و يلاحظ أنه لا يوجد معيار واضح لإنهاء الألوغوريتم، ونموذجياً يتم استخدام عدد الأجيال.

لمحة تاريخية لاستخدام الألوغوريتيمات الوراثية :

لقد كان وضع المبادئ الأساسية للألوغوريتيمات الوراثية حديثاً نسبياً، فقد كانت البدايات مع العالم Holland الذي حفزه تطور الكائنات الحية لحل مسائل أمثلية معقدة بواسطة استخدام خوارزميات تقلد عملية تطور هذه الكائنات. وأدى هذا الاقتراح إلى ظهور تقنية تُعرف بالألوغوريتيمات الوراثية (GAs) Genetic algorithms حيث قدّم Goldberg (1989) وصفاً شاملاً للمبادئ الأساسية للألوغوريتيمات الوراثية. إن استخدام الألوغوريتيمات الوراثية في الهندسة المدنية قليل نسبياً، فمثلاً في مجال الهندسة الإنشائية تم استخدام الألوغوريتيمات الوراثية في حل بعض مسائل أمثلية العناصر الإنشائية، وفي الواقع فإن استخدام الألوغوريتيمات الوراثية في الجدولة الزمنية هو من المواضيع الحديثة. لقد ركزت الأبحاث الأولى للألوغوريتيمات الوراثية على التمثيل الثنائي (bit) (أي تشفير الحلول كسلسلة من الرقمين 0 و 1) و لكن هذا التمثيل لم يكن ملائماً للعديد من المسائل المعقدة و خاصة المسائل الهندسية، و في بحثنا هذا استخدمنا تمثيل مفتاح عشوائي في الألوغوريتيمات الوراثية المستخدمة في الجدولة الزمنية لمشروعات التشييد.

إعداد الألوغوريتيمات الوراثية لاستخدامها في الجدولة الزمنية لمشروعات التشييد (استخدام تمثيل مفتاح عشوائي):

يجب اختيار تمثيل مناسب للحلول عند اختيار الألوغوريتيمات الوراثية لحل مسألة الأمثلية المطروحة. إن تمثيل مفتاح عشوائي هو أحد أنواع التمثيل الأكثر استخداماً في الألوغوريتيمات الوراثية المستخدمة لحل مسألة الجدولة الزمنية لمشروع التشييد بوجود قيود الموارد.

1- تمثيل مفتاح عشوائي Random Key Representation:

لقد استخدم الباحثون التمثيل الذي يستعمل صفاً $p=(r_1, r_2, \dots, r_n)$ والذي يعين عدداً r_j لكل نشاط j . يتم اختيار المفاتيح العشوائية للحلول الابتدائية بشكل عشوائي عادةً، و يمكن استعمال مخطط (نظام) جدولة زمنية متسلسل أو مخطط جدولة زمنية متوازٍ للحصول على الجدول الزمني من p حيث في كل مرحلة g يمكننا اختيار نشاط z الذي له المفتاح العشوائي الأعلى $r_j = \max\{r_i | i \in D_g\}$ من مجموعة القرار D_g

إن المخطط المتسلسل يعطي نتائج أفضل عندما يتم حساب عدد كبير من الجداول الزمنية ، هذا يعود إلى حقيقة أنه عند استعمال المخطط المتوازي فإنه قد يتم استبعاد كل الحلول المثلى من فضاء البحث بينما فضاء البحث للمخطط المتسلسل يحوي دوماً جدولاً زمنياً أمثلياً.

يتم حساب الجدول الزمني حسب المخطط المتسلسل كما يلي: بعد البدء بنشاط المصدر الوهمي عند زمن بدء المشروع نقوم بتحديد المجموعة D_g للنشاطات المؤهلة، حيث أن جميع النشاطات السابقة لها تمت جدولتها زمنياً، بعد ذلك نقوم بالجدولة الزمنية للنشاط المؤهل z الذي له قيمة الأولوية الأعلى $r_j = \max\{r_i | i \in D_g\}$ في أبكر زمن ممكن، بحيث لا يتم انتهاك قيود الأسبقية و قيود الموارد، نجدول زمنياً مرة بعد مرة النشاطات غير المجدولة زمنياً. في الواقع يمكن تطبيق مخطط إنشاء الجدول الزمني المتوازي بسهولة، إذ يتم حساب نقطة قرار، والتي هي الزمن الذي يبدأ عنده النشاط الذي سيجدول زمنياً ، لكل نقطة قرار يتم حساب مجموعة النشاطات المؤهلة وهي مجموعة النشاطات التي يمكن أن تبدأ عند نقطة القرار. يتم اختيار النشاطات المؤهلة على التوالي ففي كل خطوة نختار النشاط من المجموعة المؤهلة الذي له قيمة الأولوية الأعلى و ذلك إلى أن لا يبقى أي نشاط، بعد ذلك يتم حساب نقطة القرار التالية ومجموعة النشاطات المؤهلة المتعلقة بها، و يتكرر ذلك إلى أن تجدول زمنياً كل النشاطات (Kolisch, 1999).

من الواضح أنه إذا بدأنا مثلاً بزمن الانتهاء الأكثر تأخراً فعندها يتم اختيار النشاط الذي له المفتاح العشوائي الأدنى ، بكلام آخر إن المفاتيح العشوائية تؤدي دور قيم الأولوية (Kolisch, 1999). في هذا البحث سنبين ألوغوريتيمات وراثية، نعرف فيها مُلاءمة الفرد بأنها مدة المشروع للجدول الزمني المتعلق به، يمكن أن يتم تكوين كل فرد في المجتمع الابتدائي بشكل عشوائي في هذه الألوغوريتيمات الوراثية بما يتوافق مع خصائص الأفراد لنموذج المفتاح العشوائي المستخدم.

2 - الخصائص غير المتعلقة بالتمثيل المستخدم:

إن مخططات GA الأساسية التي يتم استعمالها و كذلك أنواع مؤثر الاختيار و طرق اختيار الآباء ليست محددة لتمثيل معين (Hartmann, 1998).

إن المخططات الأساسية للألوغوريتيمات الوراثية عديدة و متنوعة و فيما يلي نبين مخططاً أساسياً للألوغوريتيمات الوراثية المستخدمة لحل مسألة الجدولة الزمنية لمشروع التشييد بوجود قيود الموارد (Hartmann, 1999): يبدأ الـ GA بحساب مجتمع ابتدائي أي الجيل الأول. سنفترض أن الجيل الابتدائي يحوي $popsiz$ فرداً ، بعد حساب قيم المُلاءمة للأفراد نطبق مؤثر التصالب لإنتاج أفراد جدد (أبناء) عددهم $popsiz$ فرداً جديداً ، ثم نطبق مؤثر الطفرة على البنى الوراثية للأبناء. بعد تحديد مُلاءمة كل فرد (الأبناء) نقوم بإضافة الأبناء إلى المجتمع الحالي مما يقودنا إلى مجتمع بحجم $2 \cdot popsiz$ ، نطبق أخيراً مؤثر الاختيار لتصغير المجتمع إلى حجمه السابق فنحصل على الجيل التالي. نتوقف الخوارزمية عندما يتم الوصول إلى عدد محدد مسبقاً من الأجيال أو عندما يتم الوصول إلى حد الزمن المعطى.

توجد أنواع عديدة من مؤثرات الاختيار المتعلقة بإستراتيجية البقاء للأصلح و منها:
النوع الأول: طريقة تصنيف الرتب . حيث نبقى أفضل الأفراد في المجتمع الحالي و نزيل بقية الأفراد من المجتمع (تفك العُقَد (ties) كيفياً) (Hartmann, 1998).

النوع الثاني: الاختيار النسبي . والذي يمكن أن يبدو كنسخة ذات صفة عشوائية من تقنية تصنيف الرتب الموصوفة سابقاً. حيث يحسب احتمال موت كل فرد من الأفراد وفقاً لقيم الملاءمة لهذه للأفراد و نستعيد الحجم الأصلي للمجتمع من خلال إزالة الأفراد من المجتمع بشكل متتابع إلى أن يبقى *popsiz* فرداً.

النوع الثالث: الاختيار باستخدام تقنية المباراة . يوجد أكثر من شكل لتقنية المباراة و أهمها اختيار مباراة 2-2 (2-tournament selection) حيث يتنافس فردان تم اختيارهما عشوائياً I_1 ، I_2 على البقاء (المؤقت). إذا كان الفرد I_1 ليس أفضل من الفرد I_2 فإنه عندئذ يموت و يُزال من المجتمع (تُفك العُقد (ties) كيفياً) و يتم تكرار هذه العملية حتى يبقى *popsiz* فرداً .

يتم اختيار أزواج من أفراد المجتمع لمؤثر التصالب و توجد طرق عديدة لذلك، وأكثر الطرق استخداماً هي أن يقسم المجتمع عشوائياً إلى أزواج من الأفراد، و تطبق مؤثر التصالب لكل زوج ناتج من الأفراد لإنتاج فردين جديدين (Hartmann, 1999).

سنبين عدة نماذج لتمثيل مفتاح عشوائي لحل هذه المسألة، وهي تمثيل مفتاح عشوائي قياسي، وتمثيل مفتاح عشوائي من الأعداد الصحيحة، و تمثيل مفتاح عشوائي من أزمنة انتهاء (أو أزمنة بدء) النشاطات.

3- تمثيل مفتاح عشوائي قياسي:

سنبين الآن خصائص الألوغوريطمات الوراثة المستندة إلى تمثيل مفتاح عشوائي قياسي من خلال شرح خصائص الأفراد و التصالب والطفرة لألوغوريطم وراثي مستند إلى قيمة أولوية Priority Value based Genetic Algorithm كما يلي:

3-1: الأفراد:

يتم تمثيل الفرد I من خلال سلسلة من قيم الأولوية $I = (pv_1^I, \dots, pv_n^I)$. لكل قيمة أولوية لنشاط $j = 1, \dots, n$ لدينا $pv_j^I \in [0,1]$.

لنعد إلى مثال مشروع التشييد في الشكل (1) فباستعمال مخطط جدولة زمنية متسلسل، فإن الفرد المثال $I = (0.58, 0.64, 0.31, 0.87, 0.09, 0.34)$ متعلق بالجدول الزمني المبين في الشكل (2) .

يوجد بعض الإسهاب في فضاء البحث في التمثيل المستند إلى قيمة الأولوية، إذ إن العناصر المتميزة لفضاء البحث (أي البنى الوراثة) قد تكون متعلقة بنفس الجدول الزمني . فبالعودة مرة أخرى إلى الفرد المثال I المذكور أعلاه، من الواضح أنه لو وضعنا على سبيل المثال $pv_2^I = 0.93$ بدلاً من 0.64 فإننا نحصل على فرد مختلف، و مع ذلك فكلا الفردين متعلقان بنفس الجدول الزمني و هو المبين في الشكل (2) .

3-2: التصالب:

يسمح هذا التشفير باستعمال مؤثرات تصالب قياسية. سنعتبر فردين تم اختيارهما للتصالب: الأم M والأب F . سيتم حساب فردي ذرية منهما ، فيما يلي سنعرّف فقط الابنة D ، ويتم حساب الابن بشكل مماثل لتعريف الابنة (Hartmann, 1998):

لتصالب نقطة واحدة نأخذ رقماً عشوائياً صحيحاً q حيث $1 \leq q < n$. إن مواقع q الأولى لفرد الابنة D تؤخذ من الأم بينما المواقع الباقية تؤخذ من الأب أي:

لكل $i = 1, \dots, n$ لدينا:

$$pv_i^D = \begin{cases} pv_i^M, & \text{if } i \in \{1, \dots, q\} \\ pv_i^F, & \text{if } i \in \{q+1, \dots, n\} \end{cases}$$

بالعودة إلى مشروع التشييد المبين في الشكل (1) و $q = 3$ فإن هذا التعريف يوضح من خلال الأبوين:

$$M = (0.58, 0.64, 0.31, 0.87, 0.09, 0.34) \text{ و } F = (0.12, 0.43, 0.99, 0.65, 0.19, 0.22)$$

$$D = (0.58, 0.64, 0.31, 0.65, 0.19, 0.22) \text{ حيث نحصل على الابنة:}$$

أما لتصلب نقطتين فإننا نأخذ رقمين عشوائيين q_1 و q_2 حيث $q_2 \leq n$ و $1 \leq q_1 < q_2$ و لكل

$i = 1, \dots, n$ لدينا:

$$pv_i^D = \begin{cases} pv_i^M, & \text{if } i \in \{1, \dots, q_1\} \\ pv_i^F, & \text{if } i \in \{q_1+1, \dots, q_2\} \\ pv_i^M, & \text{if } i \in \{q_2+1, \dots, n\}. \end{cases}$$

لنعد مرة أخرى إلى الشكل (1) والأبوين المذكورين أعلاه F و M ، لأجل $q_1 = 2$ و $q_2 = 4$ فإننا نحصل على

$$. D = (0.58, 0.64, 0.99, 0.65, 0.09, 0.34) \text{ الابنة}$$

للتصلب المنتظم: نأخذ سلسلة من الأرقام العشوائية $p_i \in \{0,1\}$, $i = 1, \dots, n$ ثم نضع لكل

$i = 1, \dots, n$

$$pv_i^D = \begin{cases} pv_i^M, & \text{if } p_i = 1 \\ pv_i^F, & \text{otherwise} \end{cases}$$

لأفراد المثال أعلاه M و F وسلسلة أرقام عشوائية $0,1,1,0,1,1$ فإننا نحصل على الابنة:

$$. D = (0.12, 0.64, 0.31, 0.65, 0.09, 0.34)$$

3-3: الطفرة:

تعرف الطفرة للتشفير المستند إلى قيمة الأولوية كما يلي: لنفرض أنه لدينا الفرد I ، سنغير سلسلة قيمة الأولوية

المتعلقة به كما يلي: تؤخذ لكل المواقع $1, \dots, n$ = قيمة أولوية جديدة

$pv_i^I \in [0,1]$ باحتمال p_{mutation} . من الواضح أن النتيجة هي دوماً سلسلة قيم أولوية ممكنة. إن مؤثر الطفرة قد

يُنتج قيم أولوية (أي مورثات) لم تحدث في المجتمع من قبل. إن تطبيق الطفرة على فرد لا يؤدي بالضرورة إلى تغيير

الجدول الزمني المتعلق به، وهذا عائد إلى الإسهاب المذكور سابقاً (Hartmann, 1998).

4: تمثيل مفتاح عشوائي من الأعداد الصحيحة:

سنبين الآن خصائص الألوغوريمات الوراثية المستندة إلى تمثيل مفتاح عشوائي من الأعداد الصحيحة، من خلال

شرح خصائص الأفراد و الملاءمة و التصالب و الطفرة لألوغوريم وراثي مستند إلى قيمة أولوية من الأعداد الصحيحة

كما يلي:

1-4: الأفراد:

يتم تمثيل الفرد I من خلال سلسلة من قيم الأولوية $I = (pv_1^I, \dots, pv_n^I)$. لكل قيمة أولوية لنشاط $j = 1, \dots, n$

لدينا $\{pv_j^I \in \{1, \dots, n\}\}$ بحيث يكون: $\{1, \dots, n\} = \{pv_1^I, \dots, pv_n^I\}$.

بالعودة إلى مثال مشروع التشييد في الشكل (1) فباستعمال مخطط جدولة زمنية متسلسل فإن الفرد المثال $I=(4,5,2,6,1,3)$ متعلق بالجدول الزمني المبين في الشكل (2) . و يلاحظ هنا أيضاً وجود بعض الإسهاب في فضاء البحث فمثلاً إن الفرد $I=(4,6,2,5,1,3)$ يتعلق أيضاً بالجدول الزمني المبين في الشكل (2) .

2-4: التصالب:

يمكن أن يُستخدَم في هذا الألوغريتم الوراثةي التصالب المستند إلى الموقع Position-based Crossover (PBC) الذي تم اقتراحه في (Syswerda, 1991) و هو بشكل أساسي يأخذ بعض المورثات من أحد الأبوين (مثلاً الأم) و يملأ المواقع الفارغة بالمورثات من ثاني الأبوين (مثلاً الأب) بواسطة مسح من اليسار إلى اليمين (left-to-right scan) .

يمكن اعتبار هذا التصالب بأنه تصالب منتظم، ويمكن أن نكتب ما يلي:
سنعتبر فردين تم اختيارهما للتصالب: الأم M و الأب F . سيتم حساب فردي ذرية منهما ، فيما يلي سنعرّف فقط الابنة D ويتم حساب الابن بشكل مشابه لتعريف الابنة .

نأخذ سلسلة من الأرقام العشوائية $p_i \in \{0,1\}$, $i = 1, \dots, n$
ثم لكل $i = 1, \dots, n$: عندما $p_i = 1$ فإننا نضع: $pv_i^D := pv_i^M$
ثم لكل $i = 1, \dots, n$: عندما $p_i = 0$ فإننا نضع: $pv_i^D := pv_k^F$
باعتبار أن k هي الدليل الأدنى بحيث تكون pv_k^F لا تساوي أيّاً من قيم الأولوية المسندة سابقاً إلى مورثات الابنة.

بالعودة إلى الشكل (1) و سلسلة أرقام عشوائية $1,0,1,0,0,1$ فإن هذا التعريف يوضح من خلال:
 $F=(1,4,6,5,2,3)$, $M=(4,5,2,6,1,3)$ حيث نحصل على الابنة: $D=(4,1,2,6,5,3)$.
و بناءً على ما سبق يمكن تعريف تصالب نقطة واحدة كما يلي:
سنعتبر فردين تم اختيارهما للتصالب: الأم M و الأب F ثم نأخذ رقماً عشوائياً صحيحاً q حيث $1 \leq q < n$ ، يُنتج الأبوان فردين جديدين الابنة D والابن S . تعرّف D كما يلي:

إن المواقع $i = 1, \dots, q$ لفرد الابنة D تؤخذ من الأم أي: $pv_i^D := pv_i^M$
أما المواقع $i = q + 1, \dots, n$ لفرد الابنة D فإنها تؤخذ من الأب، إن قيم الأولوية المأخوذة من الأم يجب أن لا تُعتبر مرة أخرى، و بالتالي نحصل على:
 $pv_i^D := pv_k^F$
باعتبار أن k هو الدليل الأدنى بحيث يكون $pv_k^F \notin \{pv_1^D, \dots, pv_{i-1}^D\}$.
لنعد مرة أخرى إلى الشكل (1) والأبوين المذكورين أعلاه M و F ، لأجل $q=3$ ، فإننا نحصل على الابنة:
 $D=(4,5,2,1,6,3)$.

يحسب الابن S بشكل مشابه من الأفراد F و M ، إن المواقع $1, \dots, q$ للابن تؤخذ من الأب والمواقع الباقية تؤخذ من الأم .

سنبين الآن تصالب نقطتين وهنا أيضاً نأخذ رقمين صحيحين عشوائيين q_1 و q_2 ، حيث $1 \leq q_1 < q_2 \leq n$ و يحدد فرد الابنة D من خلال أخذ قيم الأولوية للمواقع q_1, \dots, q_2 من الأم أي:

$$pv_i^D := pv_i^M$$

تؤخذ المواقع $i = q_2 + 1, \dots, n$ أيضاً من الأم أي:

$$pv_i^D := pv_i^M$$

أما المواقع الباقية $i = q_1 + 1, \dots, q_2$ فتؤخذ من الأب:

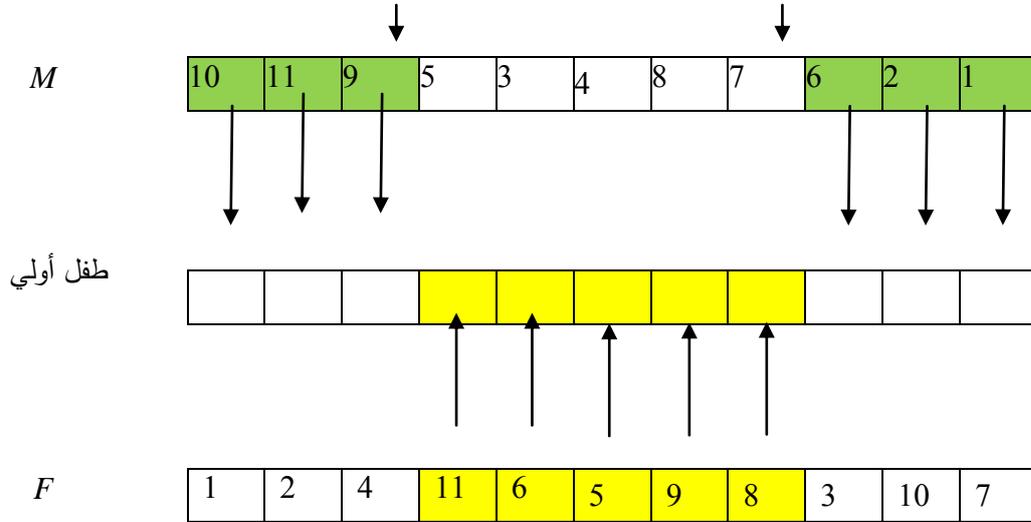
$$pv_i^D := pv_k^F$$

باعتبار أن k هو الدليل الأدنى، بحيث يكون $pv_k^F \in \{pv_1^D, \dots, pv_{i-1}^D\}$ وكذلك يكون $pv_k^F \in \{pv_{q_2+1}^D, \dots, pv_n^D\}$.
 لنعد مرة أخرى إلى الشكل (1) والأبوين المذكورين أعلاه M و F ، لأجل $q_1 = 2$ و $q_2 = 5$ فإننا نحصل على الابنة $D = (4, 5, 1, 6, 2, 3)$.

يتم حساب الفرد الابن بشكل مماثل، إذ يؤخذ الجزء الأول والثالث من الأب ثم يتم أخذ الجزء الثاني من الأم. وكذلك نلاحظ أن جعل $q_2 = n$ يقودنا إلى تصالب نقطة واحدة.

كما يمكن أن يُستخدم في هذا الألوغوريم الوراثي التصالب المُنظَّم جزئياً Partially Mapped Crossover (PMX) إذ يمكن اعتبار هذا التصالب توسيعاً لتصالب نقطتين القياسي، وهو يستعمل إجراء إصلاح خاص ليحل اللاشرعية التي يسببها تصالب نقطتين القياسي، سنبين خطوات تنفيذ هذا التصالب من خلال مثال لصبغيات مكونة من 11 مورثة وذلك للتوضيح إذ سنبين كيفية إنشاء أحد الطفلين (مثلاً الابنة) ويكون إنشاء الطفل الآخر بشكل مشابه (Gen, 2000):

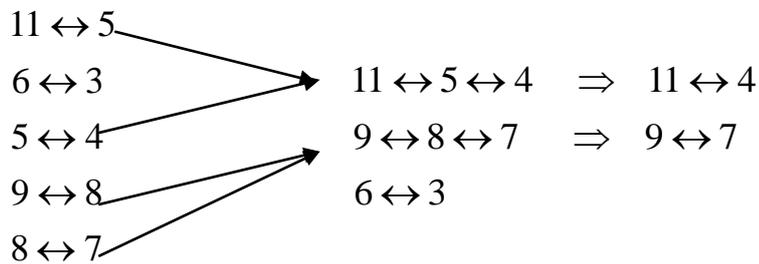
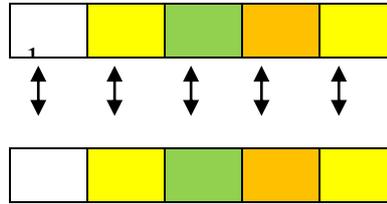
- 1- اختيار نقطتي تصالب عشوائياً: مثلاً لتكن لدينا نقطتا تصالب $q_1 = 3$ و $q_2 = 8$
- 2- إنشاء الطفل الأولي: وذلك وفقاً لتصالب نقطتي القياسي، إذ يتولد الطفل الأولي من خلال استبدال المورثات بين نقطتي التصالب لصبغيي الأم بالمورثات بين نقطتي التصالب لصبغيي الأب و يبين الشكل (4) إنشاء طفل أولي لتصالب PMX.



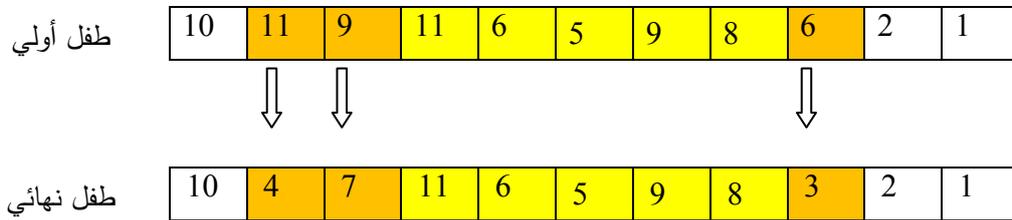
الشكل (4): إنشاء طفل أولي لتصالب PMX.

- 3- تحديد العلاقات التنظيمية: وذلك من الجزء بين نقطتي التصالب لصبغيي الأم و الجزء بين نقطتي التصالب لصبغيي الأب، إذ نستنتج علاقات الاستبدال العكسي للمورثات من خلال عمليات الاستبدال التي حدثت لإنشاء الطفل الأولي. يبين الشكل (5) تحديد العلاقات التنظيمية لتصالب PMX.
- 4- جعل الذرية قانونية: نوجد القيم المكررة وهي القيم الموجودة خارج نقطتي التصالب والتي تكون موجودة أيضاً بين نقطتي التصالب، نقوم بعملية استبدال عكسي للقيم المكررة خارج نقطتي التصالب بواسطة علاقات الاستبدال العكسي المستنتجة في الخطوة السابقة.

في هذا المثال نلاحظ أن القيم المكررة خارج نقطتي التصالب هي 11 و9 و6 . نقوم باستبدال القيمة 11 بالقيمة 4 وذلك بحسب العلاقة $11 \leftrightarrow 4$ المستنتجة في الخطوة السابقة، ونستبدل القيمة 9 بالقيمة 7 وذلك بحسب العلاقة $9 \leftrightarrow 7$ ، وأخيراً نستبدل القيمة 6 بالقيمة 3 وذلك بحسب العلاقة $6 \leftrightarrow 3$ فنحصل بنتيجة ذلك على الطفل النهائي المبين في الشكل (6):



الشكل (5): تحديد العلاقات التنظيمية لتصالب PMX .



الشكل (6): تكوين الطفل النهائي لتصالب PMX .

3-4: الطفرة:

سنبين فيما يلي طفرة المبادلة Swap Mutation: لنفرض أنه لدينا الفرد I ، سنغير سلسلة قيمة الأولوية المتعلقة به كما يلي (Gen, 2000): لكل المواقع $i = 1, \dots, n$ يتم مبادلة pv_i^I مع pv_j^I باحتمال p_{mutation} إذ يتم اختيار الموقع z عشوائياً.

5: تمثيل مفتاح عشوائي من أزمنة انتهاء (أو أزمنة بدء) النشاطات:

فيما يلي سنبين نموذج تمثيل مفتاح عشوائي من أزمنة انتهاء (أو أزمنة بدء) النشاطات. لقد تم استعمال هذا التمثيل عند دمج ميزات إضافية في الألوغوريتيمات الوراثية مثل التحسين الأمامي - الخلفي Forward-backward improvement (أي استثمار ميزات تقنية الجدولة الزمنية الأمامية - الخلفية التكرارية)، و يسمح هذا النموذج بانجاز عمليات التصالب بشكل فعال من خلال مؤثر تصالب الذروة The peak crossover operator ، وهو مؤثر مصمم خصيصاً لمسألة الجدولة الزمنية لمشروع التشييد بوجود قيود الموارد

(Debels, 2005). في الفقرات التالية سنبين خصائص الأفراد و التصالب والطفرة لألوغوريتيمات وراثية مستندة إلى تمثيل مفتاح عشوائي من أزمنة انتهاء النشاطات (أو أزمنة بدء النشاطات):

1-5: الأفراد:

يتم تمثيل الفرد من خلال سلسلة من أزمنة انتهاء (أو أزمنة بدء) النشاطات.

2-5: التصالب:

بعد اختيار الأبوين يقوم مؤثر التصالب بتركيب تمثيلي مفتاح عشوائي (RK) x_f للأب S_f و x_m للأم S_m لتكوين منجه RK جديد x_c للطفل S_c . يتم تركيب مورثات كلا الوالدين بواسطة مؤثر تصالب نقطتين مستند إلى نسخة من مؤثر تصالب الذروة الذي يستعمل نسبة استخدام الموارد Resource Utilization Ratio (RUR) التي تقيس استخدام الموارد عند الوحدة الزمنية t . نعتبر أن $Active(t, S)$ هي مجموعة النشاطات الفعالة في الجدول الزمني S عند المرحلة الزمنية t عندئذ يتم حساب RUR كما يلي (Debels, 2005):

$$RUR(t, S) = \frac{1}{K} \sum_{j \in Active(t, S)} \sum_{k=1}^K \frac{r_{j,k}}{R_k}$$

يسمح RUR باختيار مجالات زمنية يكون فيها استخدام الموارد مرتفعاً وتسمى ذرى ومجالات زمنية ذات استخدام موارد منخفض. في هذا الإجراء نحدد ذروة واحدة معروفة بالمجال الزمني $[t_1(S), t_2(S)]$ تمثل نقطتي التصالب للجدول الزمني S ولهذه الغاية فإننا نختار عشوائياً الطول l للذروة بين $\frac{1}{4} * makespan(S)$ و $\frac{3}{4} * makespan(S)$ إذ إنّ $makespan(S)$ هي مدة المشروع للجدول الزمني S ونحسب الاستخدام الإجمالي للموارد Total Resource Utilization (TRU) للجدول الزمني الجزئي الذي له الطول l وزمن البدء t بالعلاقة التالية:

$$TRU(t, l, S) = \sum_{time=t}^{t+l-1} RUR(time, S)$$

يتم اختيار الذروة ذات الطول l كمجال زمني $[t_1(S), t_2(S)]$ كما يلي: نعين $t_1(S)$ عند $t \in [t_0, t_0 + makespan(S) - l]$ التي عندها يكون $TRU(t, l, S)$ أعظماً (إذ t_0 هو زمن بدء المشروع) و نعين $t_2(S)$ عند $t_1(S) + l$. وفي بقية المجالات $[t_0, t_1(S)]$ و $[t_2(S), t_0 + makespan(S)]$ يكون معدل استخدام الموارد منخفضاً.

إن مؤثر تصالب نقطتين يستخدم نقطتي التصالب $t_1(S_f)$ و $t_2(S_f)$ من الأب لإنشاء منجه RK للطفل كما يلي:

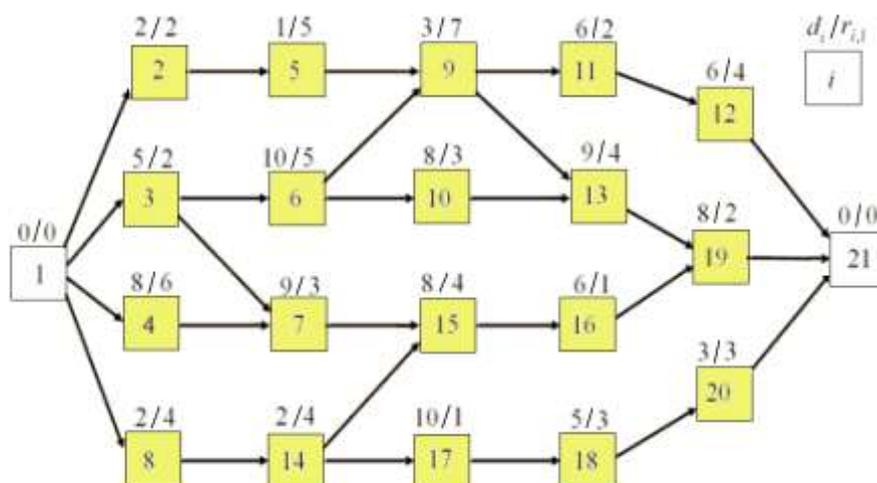
$$\text{case 1: If } x_{mi} < t_1(S_f) \Rightarrow x_{ci} := x_{mi} - c$$

$$\text{case 2: If } t_1(S_f) \leq x_{mi} \leq t_2(S_f) \Rightarrow x_{ci} := x_{fi}$$

$$\text{case 3: If } x_{mi} > t_2(S_f) \Rightarrow x_{ci} := x_{mi} + c$$

يقوم مؤثر التصالب باستبدال الجدول الزمني الجزئي الضعيف الذي له استخدام موارد منخفض للأب S_f بجدول جزئي مقابل أفضل من الأم S_m . لكي نمنع أن تختلط بنية الأولوية النسبية بين النشاطات لحالة معينة مع قيم الأولوية لنشاطات حالة أخرى، فإننا نستخدم c كثابت كبير. تجدر الإشارة إلى أنه يمكن استخدام مؤثر تصالب نقطتين من خلال أخذ نقطتي تصالب عشوائيتين ثم إنشاء منجه RK للطفل من خلال العلاقات السابقة، وكذلك يمكن استخدام مؤثر تصالب نقطة واحدة من خلال أخذ نقطة تصالب عشوائية ثم إنشاء منجه RK للطفل من خلال (case 1) و (case 2) المذكورتين أعلاه.

يمكن إنشاء الجدول الزمني الطفل المقابل بالاستناد إلى متجه RK الناتج. ثم نجعل متجه RK مكوناً من أزمنة انتهاء (أو أزمنة بدء) النشاطات للجدول الزمني الناتج.
 نبين في الشكل (7) مثلاً لمشروع تشييد له نوع موارد قابلة للتجدد وحيد، له سعة ثابتة خلال مدة المشروع مساوية لـ: $R_1 = 10$.



الشكل (7): مثال لمشروع تشييد.

يمثل الشكل (8) مثلاً لجدول زمني S_f ، لكي نحسب نقطتي التصالب $t_1(S_f)$ و $t_2(S_f)$ للذروة، فإننا أولاً نشكل مخطط استخدام الموارد بواسطة حساب RUR لكل مرحلة زمنية t . إذا تم اختيار l عشوائياً مساوية لـ 19 فعندئذٍ يكون لـ $TRU(t, 19, S_f)$ قيمة عظمى تساوي 16.8 عندما $t=11$ و بالنتيجة $t_1(S_f)$ تساوي 11 و $t_2(S_f)$ تساوي 30 .

لنعتبر أن الجدول الزمني الأم S_m كما هو مبين في الشكل (9) . يظهر الجدول (2) متجهي x_f :RK للأب S_f و x_m للأب S_m المكونين من أزمنة انتهاء النشاطات. وبما أن 11 و 30 هما نقطتا التصالب للأب فإنه يتم حساب متجه x_c :RK للطفل كما هو مبين في الجدول (2) .

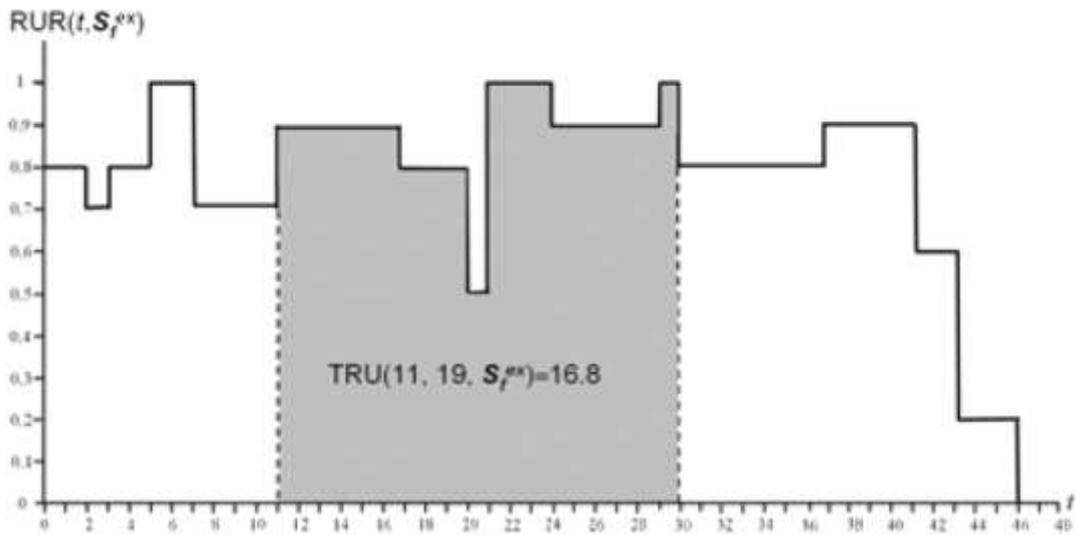
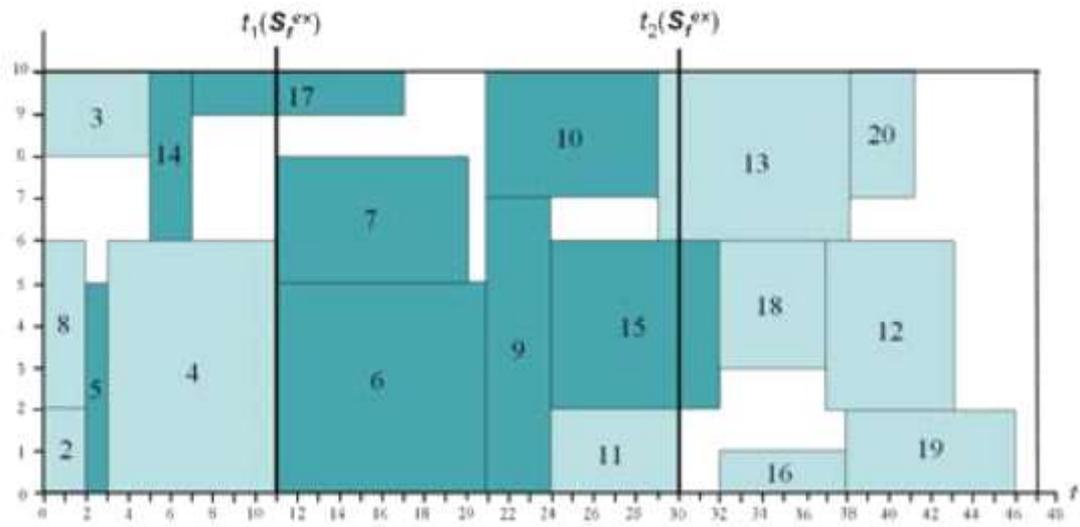
إن النشاطات ذات اللون الداكن 5, 6, 7, 9, 10, 14, 15, 17 الداكن حيث $x_{mi} \in [11, 30]$ تنتمي إلى الحالة 2 ونتيجة لذلك فإن قيم الأولوية x_{fi} يتم نسخها في x_{ci} .

إن النشاطات 11, 12, 13, 16, 18, 19, 20, 21 حيث $x_{mi} > 30$ تنتمي إلى الحالة 3 بينما بقية النشاطات 1, 2, 3, 4, 8 حيث $x_{mi} < 11$ تنتمي إلى الحالة 1 . النشاطات ذات اللون الباهت في الحالة 1 والحالة 3 نستعمل لها x_{mi} المقابلة كقيم أولوية في x_c ، على أي حال يجب أن يُطرح ثابت كبير c للنشاطات من الحالة 1 ويجب أن يضاف c للنشاطات من الحالة 3 لتجنب أن نخلط بنى الأولوية للحالة 1 والحالة 2 والحالة 3 ، وفي هذا المثال وضعنا $c=50$. يتم إنشاء الجدول الزمني الطفل المقابل بالاستناد إلى متجه x_c : RK كما ذكرنا سابقاً.

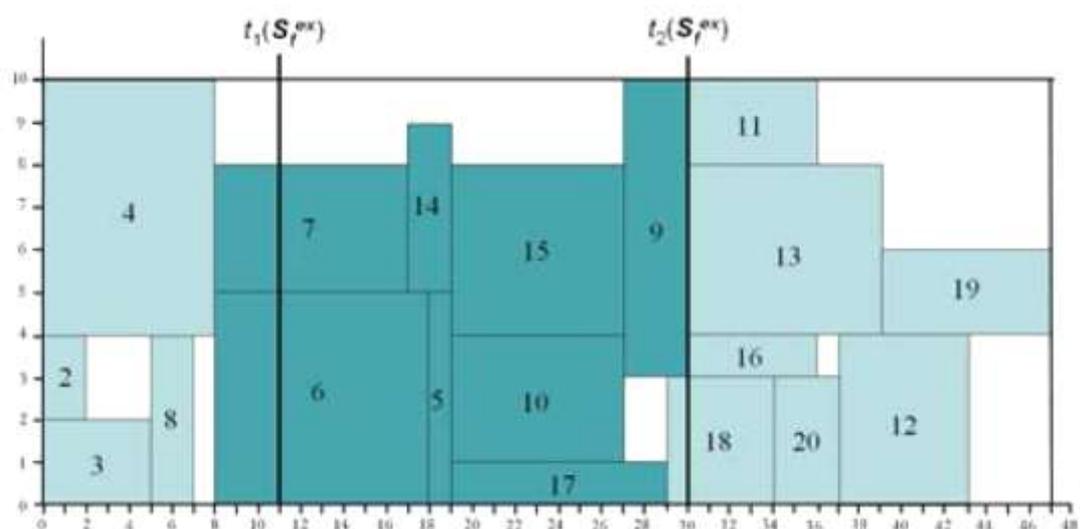
الجدول (2): حسابات مؤثر التصالب.

Act.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
x_f	0	2	5	11	3	21	20	2	24	29	30	43	38	7	32	38	17	37	46	41	46

x_m	0	2	5	8	19	18	17	7	30	27	36	43	39	19	27	36	29	34	47	37	47
x_c	-50	-48	-45	-42	3	21	20	-43	24	29	86	93	89	7	32	86	17	84	97	87	97



الشكل (8): الجدول الزمني S_f ومخطط استخدام الموارد المقابل.

الشكل (9): الجدول الزمني S_m .

3-5: الطفرة :

تطبق الطفرة على الطفل x_c من خلال انحراف عشوائي لقيم الأولوية بواسطة إضافة رقم عشوائي يقع ضمن مجال معين، فمثلاً يمكن أن يكون هذا المجال هو $[-n, n]$ (Debels, 2005).

النتائج و المناقشة:

إن نموذج تمثيل مفتاح عشوائي المستخدم يؤثر في خصائص الأفراد في الألوغوريتيمات الوراثة كما يؤثر أيضاً في خصائص التصلب، فعند استخدام تمثيل مفتاح عشوائي قياسي و الذي فيه تأخذ المورثات قيماً ضمن المجال $[0,1]$ فإنه يتم استخدام مؤثرات تصالب قياسية، أما لحالة تمثيل مفتاح عشوائي من الأعداد الصحيحة فإنه يتم استخدام التصلب المستند إلى الموقع كما يمكن استخدام التصلب المُنظَّم جزئياً، وعند استخدام تمثيل مفتاح عشوائي من أزمنة انتهاء (أو أزمنة بدء) النشاطات فإنه يتم استخدام مؤثرات التصلب الخاصة به، كما يسمح هذا التمثيل باستخدام مؤثر تصالب الذروة الذي يستعمل نسبة استخدام الموارد، و تتأثر أيضاً خصائص مؤثر الطفرة وفقاً لنموذج تمثيل مفتاح عشوائي المستخدم.

الاستنتاجات و التوصيات:

- 1- إن تمثيل مفتاح عشوائي هو من أنواع التمثيل التي يمكن استخدامها لتمثيل الجدول الزمني و في هذا البحث استخدمنا هذا التمثيل في الألوغوريتيمات الوراثة التي قمنا بملاءمتها لحل مسألة الجدولة الزمنية لمشروع التشييد بوجود قيود الموارد و المفاتيح العشوائية التي تؤدي دور قيم الأولوية.
- 2- لقد بيّنا في هذا البحث عدة نماذج لتمثيل مفتاح عشوائي لحل هذه المسألة، وهي تمثيل مفتاح عشوائي قياسي، و تمثيل مفتاح عشوائي من الأعداد الصحيحة و تمثيل مفتاح عشوائي من أزمنة انتهاء (أو أزمنة بدء) النشاطات.

